

## АНАЛІЗ ПОХИБОК ГЕОМЕТРИЧНОЇ КОРЕКЦІЇ СПЕКЛ-ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є–МЕЛІНА

О. П. Максименко

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

E-mail: maksymenko@ipm.lviv.ua

Проаналізовано похибки, які виникають під час визначення параметрів відносних геометричних трансформацій спекл-зображень, та показано їх вплив на точність встановлення дійсних деформацій поверхні. Отримано аналітичні вирази для оцінювання похибок та шляхом комп'ютерного моделювання показано справедливість таких оцінок. Для кращого виявлення інформативного крос-кореляційного піка запропоновано використовувати височастотну фільтрацію спектральних амплітуд перед лог-полярним перетворенням.

**Ключові слова:** цифрова кореляція зображень, лог-полярне перетворення Фур'є–Меліна, оцінка похибок, геометрична корекція спекл-зображень.

## ANALYSIS OF THE ERRORS OF GEOMETRICAL CORRECTION OF SPECKLE IMAGES BASED ON FOURIER-MELLIN TRANSFORM

O. P. Maksymenko

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

The errors of an algorithm then determining parameters of the relative geometric transformations of the speckle images, based on log-polar Fourier–Melina transform are analyzed. The analytical expressions for estimation of the errors in determining the relativity rotation and scaling are proposed. The computer simulation based on speckle images modeling confirms the validity of the proposed analytical expressions. Results presented in this paper show the linearity of the relativity rotation angle error and is inversely proportional to the size of the speckle image, while the error set of the scale is nonlinear. For reliable detection of the informative correlation peak, the high-frequency filtering of the spectrum amplitude of the speckle image, before the log-polar transform is used. The results obtained in the work allow assessing the errors which arise when the geometrical transformations of speckle images are present and its influence on the accuracy of the actual deformation fields calculated after correction of the transformation of speckle images.

**Keywords:** digital image correlation, Fourier–Mellin log-polar transform, errors estimation, geometrical correction of speckle-images.

Під час визначення поверхневих деформацій безконтактними оптико-цифровими системами (ОЦС) можуть виникати неконтрольовані переміщення системи реєстрації відносно об'єкта контролю, які негативно впливають на результати вимірювань, спотворюючи дійсні розподіли деформацій [1]. Для усунення цього негативного чинника ОЦС закріплюють на об'єкті [2], або використовують складні фотограмметричні системи [3, 4], які складаються з декількох синхронно працюючих відеокамер для реєстрації зображень досліджуваної поверхні під різними кутами спостереження. Перший спосіб незручний і незавжди технічно можливий, а другий потребує значних матеріальних затрат та складного калібрування.

Коли відбуваються геометричні трансформації зображень (зміна масштабу, відносні повороти, зміщення), то для встановлення дійсних деформацій поверхні об'єкта необхідно попередньо виконати корекцію геометричних спотворень зареєстрованих зображень. Для цього використовують алгоритм корекції геометричних трансформацій спекл-зображень на основі лог-полярного перетворення Фур'є–Меліна (ПФМ) [5–7].

© О. П. Максименко, 2016

Мета роботи – оцінити похибки визначення параметрів для геометричної корекції спекл-зображень та їх вплив на похибку встановлення деформацій поверхні досліджуваного об'єкта.

**Алгоритм визначення параметрів для коригування геометричних трансформацій спекл-зображень.** Для знаходження коригувальних параметрів використаємо алгоритм на основі ПФМ [7]. За цим алгоритмом після Фур'є-перетворення вхідних зображень їх спектри подають в лог-полярних координатах  $F\{r(x, y)\} = R(v, \omega) \Rightarrow R_{pl}(v, \omega)$  і  $F\{s(x, y)\} = S(v, \omega) \Rightarrow S_{pl}(v, \omega)$ . Вихідне спекл-зображення та розподіл його спектральних амплітуд у лог-полярних координатах показані на рис. 1.

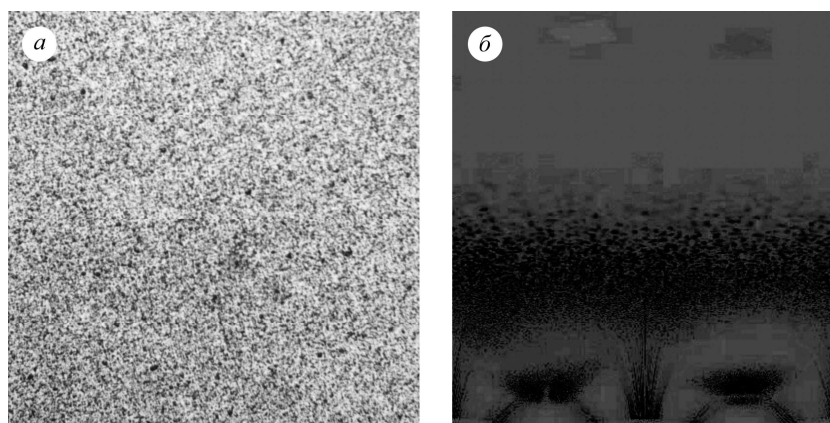


Рис. 1. Вихідне спекл-зображення (а) та спектр амплітуд у лог-полярних координатах (б).

Для виокремлення шуканих коригувальних параметрів отримані амплітуди спектрів кореляційно порівнюємо, використовуючи алгоритм крос-кореляції в спектральній площині (ККСП) з інверсним фільтром [8]. Тоді після зворотного перетворення Фур'є формується фазовий кореляційний пік.

Відхилення координат максимуму цього піка від центра вздовж однієї координати відповідає зміні масштабу, а вздовж другої – відносному куту повороту зображень. Це дає змогу визначити відносний кут повороту  $\theta = \alpha_{pic}$  і коефіцієнт зміни масштабу  $\mu = e^{p_{pic}}$  між двома порівнюваними зображеннями за зміщенням максимуму інформаційного піка  $\max[\phi_0(\alpha, p)] = (\alpha_{pic}, p_{pic})$  [7].

Аналіз запропонованого алгоритму показав, що сумарна похибка цього алгоритму залежить від розмірів і параметрів вхідних спекл-зображень, похибки алгоритму субпіксельного визначення координат піка крос-кореляції та параметрів інверсного фільтра, які змінюють спектральний розподіл зображень. Також певний вплив на точність визначення параметрів зумовлює коректність числової реалізації алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

**Високочастотна фільтрація амплітудного спектра.** Для забезпечення малої похибки вимірювання спекл-зображення, які використовують під час визначення деформацій поверхні, повинні мали контрастну випадкову текстуру. Для оптично шорсткої поверхні та за когерентного освітлення формуються лазерні спекли, розміри яких визначають параметри об'єктива, шорсткість поверхні і спосіб реєстрації. Але умови формування лазерних спеклів на реальних об'єктах створити складно, до того ж часто використовують некогерентне освітлення. Тому, за відсутності вираженої текстури поверхні матеріалу, створюють “штучні спекли” – випадкову плямисту структуру. Найпростішим способом формування

штучних спеклів є нанесення на поверхню контрастних фарб. Результат такого способу формування спеклів показаний на рис. 1а. Якщо в ОЦС використовують відеокамери з невеликим розділенням і чутливістю за недостатнього освітлення, то у спектрах зареєстрованих спекл-зображень зі штучними спеклами будуть переважати низькочастотні складові. Після лог-полярного перетворення амплітуд спектів енергія низькочастотних складових зростає суттєво порівняно з високо-частотними. В результаті після ККСП лог-полярних амплітудних спектів на основі виразу (7) праці [7] утворюється два піка. Один з великою амплітудою в центрі координат, який маскує другий інформативний кореляційний пік з невеликою амплітудою, координати максимуму якого зміщені відносно центра. Для надійного виявлення інформативного кореляційного піка необхідно усунути центральний пік. Для цього здійснюють високочастотну фільтрацію амплітудного спектра після ШПФ вхідних спекл-зображень. Для цього використовують [9] вузькосмуговий високочастотний фільтр (Hi-pass).

У цій роботі для побудови просторового фільтра використовували вікно Хана (Hann)

$$h(m, n) = 1 - 0,25 \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right]. \quad (1)$$

Застосувавши фільтр Хана, отримали відфільтровані амплітудні спектри

$$|R_{HF}(v, v)| = |R(v, v)| \times h(m, n), \quad |S_{HF}(v, v)| = |S(v, v)| \times h(m, n), \quad (2)$$

які потім подали у лог-полярних координатах

$$|R_{HF}(v, v)| \Rightarrow |R_{HFpl}(v, v)|, \quad |S_{HF}(v, v)| \Rightarrow |S_{HFpl}(v, v)|. \quad (3)$$

Показано (рис. 2а) центральний переріз амплітудного спектра спекл-зображення розміром 2000×2000 пікселів без фільтрації, а на рис. 2б – після застосування фільтра Хана. З наведених рисунків видно, що фільтрація усуває низькочастотні складові і після ККСП

$$\phi_0(\alpha, p) = F^{-1} \left[ \frac{R_{HFpl}^*(v, w) S_{HFpl}(v, w)}{|R_{HFpl}(v, w) S_{HFpl}(v, w)|^{1-A}} \right] \quad (4)$$

формується один інформативний кореляційний пік. Його координати відповідають шуканим параметрам відносних геометричних трансформацій порівнюваних спекл-зображень.

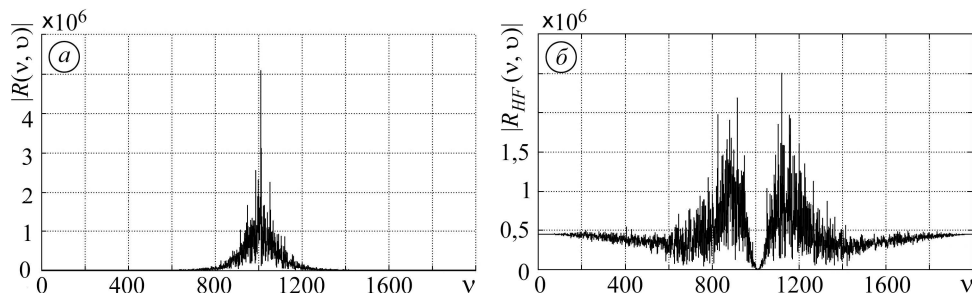


Рис. 2. Переріз Фур'є спектра спекл-зображення до (а) та після (б) високочастотної фільтрації.

**Аналіз похибок визначення геометричних трансформацій спекл-зображень.** Очевидно, що точність встановлення відносного кута повороту спекл-зображень  $\theta$  і зміни масштабу  $\mu$  насамперед визначатимуться розмірами цифрових

зображень ( $M, N$ ). Припускаючи, що кут відносного повороту спекл-зображень знаходиться в межах  $-90^\circ \dots 90^\circ$ , можна оцінити похибку встановлення відносного кута повороту, виходячи з кількості пікселів зображення та похибки субпіксельного алгоритму

$$\Delta\theta = \frac{180 \cdot \xi}{N}, \quad (5)$$

де  $N$  – розмір зображення в одному з напрямків,  $\xi$  – похибка алгоритму субпіксельного визначення координат піка після ККСП. Як бачимо, отримана оцінка похибки визначення кута обернено пропорційна до розміру зображення і прямо пропорційна до похибки субпіксельного алгоритму.

Якщо під час лог-полярного перетворення використовують натуральні логарифмічні координати, то дискретність відліків вздовж другого напрямку, який відповідає за зміну масштабу,  $\delta\mu = \ln(M)/M$ . Похибка визначення коефіцієнта зміни масштабу нелінійно залежить від лог-полярного радіуса  $p$  і різна на кожному інтервалі від  $p$  до  $p+1$ . Для її оцінки розрахуємо модуль усередненої різниці між дійсним  $p$  і оцінюваним масштабом  $x$ , вважаючи, що оцінювані значення в межах інтервалу від  $p$  до  $p+1$  визначають з похибкою застосованого субпіксельного алгоритму, а початок лог-полярної системи координат знаходиться в центрі зображення.

За відносного збільшення порівнюваних спекл-зображень  $\mu > 1$  дискретні значення лог-полярного радіуса знаходяться в діапазоні  $0 \leq p < M/2$  і похибка дорівнюватиме

$$\Delta\mu = \int_{p-\xi}^{p+\xi} \left| \exp\left[\frac{\ln M}{M} p\right] - \exp\left[\frac{\ln M}{M} x\right] \right| dx. \quad (6)$$

За відносного зменшення зображення  $\mu < 1$ ,  $M/2 < p \leq M$  матимемо:

$$\Delta\mu^{-1} = \int_{p-\xi}^{p+\xi} \left| \exp\left[\frac{\ln M}{M} (M-p)\right] - \exp\left[\frac{\ln M}{M} (M-x)\right] \right| dx. \quad (7)$$

Інтегрувавши вирази (6) і (7), отримаємо залежність похибки визначення масштабу від розміру зображення, похибки субпіксельного алгоритму та масштабу.

Для  $0 \leq p < M/2$

$$\Delta\mu = \frac{M^{(M+p-\xi)/M} \left[ M^{\xi/M} - 1 \right]^2}{\ln(M)}, \quad (8)$$

а для  $M/2 < p \leq M$

$$\Delta\mu^{-1} = \frac{M^{-(-2M+p+\xi)/M} \left[ M^{\xi/M} - 1 \right]^2}{\ln(M)}. \quad (9)$$

Графічне подання похибки визначення масштабу від його значення  $\mu_0$  для двох значень субпіксельної оцінки координат піка  $\pm 0,1$  і  $\pm 0,2$  піксела показано на рис. 3. Розраховано для зображення розміром  $M = 1000$ . З наведеного графіка видно, що похибка мало змінюється зі збільшенням зображення і, навпаки, суттєво зростає за невеликого зменшення. Під час розрахунку полів деформацій масивних конструкцій зазвичай відбуваються невеликі зміни масштабу зображень в діапазоні  $\pm 0,5\%$ , але точність визначення параметрів геометричної трансформації спекл-зображень повинна бути високою. З наведеного графіка видно, що при

$\xi = \pm 0,1$  і  $\mu_0 = 99,5\%$  похибка визначення масштабу така:  $\Delta\mu_{M=1000} \leq 4 \cdot 10^{-4}$  (рис. 3). Така залишкова некомпенсована зміна масштабу незадовільна під час високоточних вимірювань розподілів деформацій, оскільки призводить до появи додаткових деформацій такого ж порядку значень.

Щоб зменшити похибку визначення параметрів геометричних трансформацій спекл-зображень, необхідно використовувати зображення з більшим розділенням і кращі субпіксельні алгоритми.

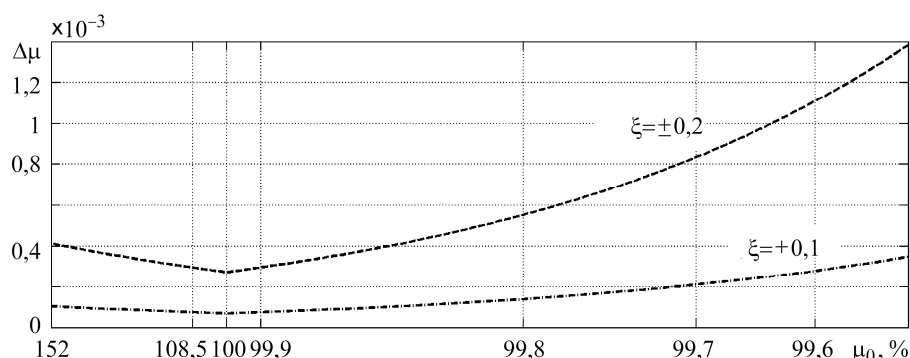


Рис. 3. Теоретична оцінка похибок визначення масштабу.

**Експериментальна оцінка похибок визначення параметрів геометричних трансформацій спекл-зображень.** Отримані вирази (5), (8) і (9) дають приблизну оцінку похибок, оскільки не враховують реальні характеристики спекл-зображень, вплив високочастотної фільтрації, електронні шуми тощо. Для точнішої оцінки похибок визначення параметрів геометричної трансформації спекл-зображень виконали комп'ютерне моделювання, під час якого створювали серії модельних трансформованих зображень за використання реального спекл-зображення (див. рис. 1а) розміром  $1280 \times 1024$  пікселів. Це зображення за допомогою афінного перетворення трансформували, змінюючи окремо масштаб  $\mu_0$  в діапазоні від 0,995 до 1,005 і кут повороту від  $0^\circ$  до  $5^\circ$  з кроком  $1^\circ$ . Для подальших розрахунків вирізали центральну частину всіх трансформованих зображень розміром  $1000 \times 1000$  пікселів і визначали відносні зміни масштабу  $\mu^m$  і кута  $\theta^m$  модельних зображень, використовуючи алгоритм на основі ПФМ [7] та розраховували абсолютні похибки  $\Delta\mu_M^m = |\mu^m - \mu_0|$  і  $\Delta\theta_N^m = |\theta^m - \theta_0|$ . За подальшого моделювання для розрахунків використовували збільшені розміри вирізаних частин зображень ( $2000 \times 2000$  пікселів), які отримували білінійною інтерполяцією. За програмної реалізації алгоритму під час лог-полярного перетворення застосовували також лінійну інтерполяцію для узгодження дискретних даних двох систем координат. В результаті для розрахунку похибок за виразами (5) і (8), (9) під час першого і другого моделювання використовували відповідно  $M = N = 2000$  і  $M = N = 4000$ .

Під час програмної реалізації алгоритму знаходження параметрів геометричної трансформації спекл-зображень використали швидкий алгоритм субпіксельного суміщення зображень, який за виконаними раніше оцінками для подібних за текстурою спекл-зображень забезпечує похибку не більше  $\xi = \pm 0,03$  пікселів [10]. Для звичайного комп'ютера і неоптимізованого MATLAB коду час необхідний для визначення параметрів геометричних трансформацій спекл-зображень розміром  $2000 \times 2000$  пікселів алгоритмом на основі ПФМ становив 2,7 с, а для зобра-

жень розміром 4000×4000 пікселів – 10,3 с. Порівнюючи похибки встановлення масштабу (табл. 1), отримані під час моделювання  $\Delta\mu_M^m$  і  $\Delta\theta_N^m$ , та розраховані значення цих похибок за виразами (8) і (9) для  $\xi = \pm 0,03$ , бачимо, що похибки, отримані під час комп'ютерного моделювання, більші за теоретичні у всьому досліджуваному діапазоні. Також видно, що збільшення у два рази розмірів вхідних зображень шляхом інтерполяції зменшує похибку визначення масштабу на порядок і наближає її до теоретичних оцінок, крім значень масштабу близьких до одиниці  $0,998 \leq \mu_0 \leq 1,002$  (виділено сірим кольором в табл. 1), де похибки залишаються практично незмінними. Мала чутливість алгоритму на основі ПФМ для значень масштабу близьких до одиниці зумовлена неідеальністю високочастотної фільтрації, яка спотворює амплітуду інформативного піка.

Розрахована за виразом (5) похибка визначення відносного кута повороту спекл-зображень, коли  $\xi = \pm 0,03$ , становить відповідно  $\Delta\theta_{N=2000} \approx \pm 0,003^\circ$  та  $\Delta\theta_{N=4000} \approx \pm 0,0014^\circ$ . Отримані оцінки менші за похибки моделювання, що зумовлено впливом характеристик реальних спекл-зображень. Результати показують (табл. 2), що збільшення у два рази розмірів спекл-зображень зменшує похибку визначення відносного кута повороту зображень в середньому тільки на 20%...40%.

**Таблиця 1. Похибки визначення масштабу**

$\Delta\mu_{M=4000}^m$	$\Delta\mu_{M=4000}$	$\mu_0$	$\Delta\mu_{M=2000}$	$\Delta\mu_{M=2000}^m$
$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	0,9950	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	0,9960	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0,9970	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,9980	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
$9,0 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	0,9990	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$
$9,0 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$	1,0010	$3,43 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$
$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-6}$	1,0020	$3,44 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-6}$	1,0030	$3,44 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-6}$	1,0040	$3,45 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$	1,0050	$3,46 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$

Загалом отримані результати показують, що за допомогою звичайної відеокамери з невеликим розділенням (1280×1024 пікселів) і алгоритму на основі

**Таблиця 2. Похибки визначення кута відносного повороту (в градусах)**

$\Delta\theta_{N=4000}^m$	$\theta_0$	$\Delta\theta_{N=2000}^m$
0,0045	1	0,0054
0,0026	2	0,0032
0,0057	3	0,0070
0,0048	4	0,0083
0,0085	5	0,0062

ПФМ можна досить точно визначити параметри відносних геометричних трансформацій спекл-зображень. Використання цих параметрів для корекції геометричних трансформацій спекл-зображень дає змогу зменшити додаткову похибку визначення деформацій, яка виникла через зміну масштабу в діапазоні  $\pm 0,5\%$ , до рівня не більше 0,1% та компенсувати відносні повороти зображень, які спотворюють поля деформацій, з похибкою не більше  $0,01^\circ$  за зміни кута на  $\pm 5^\circ$ .

## ВИСНОВКИ

Проаналізовані похибки алгоритму визначення параметрів відносних геометричних трансформацій спекл-зображень на основі лог-полярного перетворення Фур'є–Меліна. Отримано аналітичні вирази для оцінки цих похибок та шляхом комп'ютерного моделювання показано справедливість таких оцінок. Встановлено, що похибка визначення відносного кута повороту спекл-зображень лінійно і обернено пропорційно залежить від розміру зображень, тоді як похибка встановлення масштабу нелінійна. Для надійного виявлення інформативного кореляційного піка застосовано високочастотну фільтрацію спектра амплітуд перед лог-полярним перетворенням. Отримані результати дозволяють оцінити вплив похибок визначення параметрів відносних геометричних трансформацій спекл-зображень на точність встановлення дійсних полів деформацій після корекції.

1. Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements (Basic Concepts, Theory and Applications). – New York: Springer, 2009. – 364 p.
2. Improved plant availability by advanced condition based inspections / H. J. M. Hulshof, J. W. Notebooma, P. G. M. Welberga, L. E. Bruijn // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2004. – **81**. – P. 491–497.
3. Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection / D. V. Jauregui, K. R. White, C. B. Woodward, K. R. Leitch // J. of Bridge Eng. – 2003. – **8**, № 4. – P. 212–222.
4. Application of image based methods for monitoring and measurements of structures in power stations / M. Kujawińska, M. Malesa, K. Malowany, P. M. Błaszczyk // Key Eng. Materials. – 2012. – **518**. – P. 24–36.
5. Chen Q., Defrise M., Deconinck E. Symmetric phase-only matched filtering of fourier-mellin transforms for image registration and recognition // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1994. – **16**, № 12. – P. 1156–1168.
6. Robust digital speckle photography based on radon and fourier-mellin transforms / E. N. Kamau, C. V. Falldorf, C. Kopylow, R. B. Bergmann // Proceedings of SPIE. – 2011. – **8202**. – P. 82020A1–82020A8.
7. Максименко О. П. Застосування перетворення Фур'є–Меліна для цифрової кореляційної обробки спекл-зображень // Відбір і обробка інформації. – 2016. – Вип. 44 (120). – С. 56–62.
8. Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method / D. J. Chen, F. P. Chiang, Y. S. Tan, H. S. Don // Applied Optics. – 1993. – **32**, № 11. – P. 1839–1849.
9. Reddy B. S., Chatterji B. N. An FFT-based technique for translation, rotation and scale-invariant image registration // IEEE Transact. on Image Proc. – 1996. – **5**, № 8. – P. 1266–1271.
10. Максименко О. П. Швидкий алгоритм субпіксельного суміщення зображень // Відбір і обробка інформації. – 2014. – Вип. 41 (117). – С. 70–76.

Одержано 07.07.2016